

マッスルスーツ[®]の機能訓練への適用

東京理科大学 工学部 機械工学科 教授 こばやし ひろし
小林 宏

開発の背景・理念

人間の動作を物理的に支援するための着用型筋力補助装置：マッスルスーツを考えたのは、ちょうど2000年でした。その頃は、ホンダのASIMOやソニーのSDR、アイボなどの影響もあり、国内は人型・生物型ロボット全盛期で、非常に多くの研究開発が行われ、ロボットで何でもできるような風潮でした。

当時、産業用ロボットは7,000億円程度、非産業用ロボットは数十億円程度の市場規模でしたが、2010年頃には、非産業用ロボットの市場は2兆円に膨らむという予測もありました。ちょうど現在のAIブームのような感じでした。しかしながら、人型ロボットは歩くことはできても整地だけで、手に持てるのは数百g程度と限られており、また、人工知能も不十分で人間のような知能はいつ実現できるか分からない状況だったため（これはAIブームの現在でも変わっていない）、社会に広く普及するためのハードルが沢山あると著者は感じていました。そして、ロボットに固執することなく、エンジニアとして、本当に役に立つ物を作りたいと考えていました。

ところで、人間が生きていく上で一番嫌なこと、精神的に最も負担となることの一つは、自分の力で動けず、人の世話になること、すなわち、「自立」できなくなることではないかと思います。そのため、それを解決する装置を作れば、本当に役に立つ物になると考え、まず、「動けない人を動けるようにする」ための装置の開発を2001年から始めま

した。歩行も実現したかったのですが、常に転倒のリスクがあるので、まずは腕の補助装置の開発から始めました。

空気圧式McKibben型人工筋肉

動く物を開発する場合に最も重要となる要素の一つに、アクチュエータの選定があります。体に付ける装置では、軽さ、柔らかさ、力強さ、という、相反する性能が要求されますが、圧縮空気をを用いたMcKibben型人工筋肉ならこれらの条件を満たすと考え、採用することにしました。圧縮性のある空気を使っているため位置決め精度が低く、ロボットには不向きといえますが、人間の動きのアシストにはロボットほどの精度は要求されず、欠点が欠点にならないと考えました。

McKibben型人工筋肉は、1957年にJoseph McKibbenにより、四肢疾患のリハビリテーションや装具用のアクチュエータとして発明されました。空気圧式のためコンプレッサが必要となりますが、自重の2,000倍近くの収縮力を発生します。マッスルスーツで使っているMcKibben型人工筋肉の場合は、直径1.5インチ、長さ300mm、重さ130gで、0.5MPa（約5気圧）を入れると250kgf以上の引張り力を発生します。

図1にMcKibben型人工筋肉の構造と動作メカニズムを示します。伸縮性のないポリエステルモノフィラメント製の繊維コードを格子状に編んだスリーブでゴムチューブを覆い、スリーブの両端を固定します。チューブ

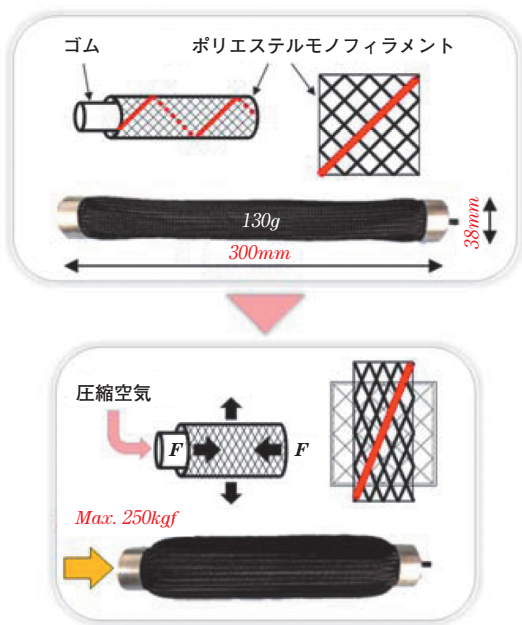


図1 McKibben型人工筋肉の構造と動作原理

内の圧力を上げるとチューブは半径方向に膨張し、このとき生じる円周方向の張力が繊維コードにより軸方向の大きな収縮力に変換されます。

腰補助用マッスルスーツの開発

「動けない人を動けるようにする」ことを目標に、先述のようにまず、腕の動作を補助するマッスルスーツの開発を始めました。図2はマッスルスーツの最初のコンセプトモデルで、服に人工筋肉を直接取り付け付けた内骨格型でしたが、

- ・人工筋肉の収縮が服のずれに吸収されてしまい大きな動きができない
- ・骨や関節に負担がかかる

という問題点が明らかとなり、図3に示す外骨格モデルに変更しました。この場合、金属フレームを人工筋肉で動かすことで、着用者を動かします。

工場などで実際に腕を補助する実験を行い、その結果を受けて改良を繰り返しましたが、特定の動作の補助にとどまること、腕の周りにフレームがあって邪魔なこと、常に使



図2 McKibben型人工筋肉の構造と動作原理



図3 腕補助用マッスルスーツ外骨格モデル

うわけではないこと、などの理由で実用化には至りませんでした。ただ、さまざまな場所で実際の作業者に使ってもらっていたところ、ほとんどの方が腰痛に悩まされていることが分かりました。腰は腕よりも使用頻度が高く、基本的に体幹の伸展動作のみで簡単であり、また、腰痛は多くの方が困っている疾患であることから多くの方に適用できると考え、2006年から腰補助に特化したマッスルスーツの開発を開始しました。

現在の腰補助用マッスルスーツの動作原理を図4に示します。図中右において、黒い円で表すプーリー（固定プーリー）の周りを白抜きの円が回転します。白抜きの円には背中フレームが接続されており、人工筋肉の上部一端を背中フレーム上部に固定し、他端につけたワイアを固定プーリーに接続します。これにより、人工筋肉の収縮力が固定プーリー回りの背中フレームの回転力に変換され、上半身を起こす力となります。また、固定プーリーから腿

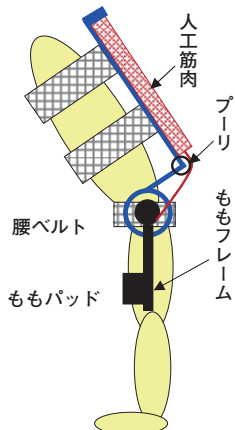


図4 腕補助用マッスルスーツの動作原理

モデル), 0.5MPaを供給する場合は, 最大で140Nm (回転中心から0.4mで35kgの補助力) という大きな補助力を実現しています。

補助力の大きさに加え, 脱着の容易さも非常に重要な要素です。マッスルスーツは, 背負った後に腰ベルトを締め, 腿パッドを腿の前に持ってくるだけで装着が完了するため, 慣れると10秒程度で装着でき, ワイシャツを着るよりも早く装着も脱着もできます。

機能訓練への適用

これまで述べた腰補助用マッスルスーツは, 肉体労働者用として開発し, 販売してきました。2014年から正式に販売を開始し, 2017年4月には3,000台を出荷しました。着用型の補助装置としては世界初であると共に, これだけ売れている装置は世界的にみてもマッスルスーツのみです。

ところで, 2015年4月の展示会がきっかけで, 歩行に関する機能訓練にも非常に有効であることが分かってきました。腰補助用マッスルスーツは, 体幹の伸展 (下半身に対して上半身をまっすぐに伸ばす) を行う機能がありますが, 機能訓練では, 新たに, 屈曲 (上半身に対して下半身を曲げる, すなわち, 腿を上げる) が可能となる屈曲補助モデルを用意しました。これは, 固定プーリに設置するワイヤの巻き付ける方向を逆にすることで実現します。

機能訓練では, 腰補助用マッスルスーツを使った2種類の運動と, 屈曲補助モデルを使った1種類の運動の合計3種類の運動を, 5分~10分程度で行います。具体的には, 腰補助用マッスルスーツを使った運動は,

- ① スクワット運動時の立上り補助 (写真1左)
- ② 前屈からの伸展運動



写真1 マッスルスーツによる機能訓練

フレームを伸ばし, それに取り付けた腿前面を覆う腿パッドにより, 上半身を起こす力の反力を受けます。

この構造では, 上半身を起こすトルクを腿で直接受け, 腿に対して上半身を回転させ, 腿と上半身がまっすぐになるように補助力が働きます。そのため, 腿を直立状態で上半身を起こす動作, および, 上半身を直立状態にして腰を落として脚の力で物を持ち上げる動作のどちらにも補助力を発生し, 結果として腰や脚への負担を軽減します。腰補助用マッスルスーツでは, McKibben型人工筋肉を左右に2本ずつ, 合計4本使用しており (標準

の2種類で、屈曲補助モデルの場合は、

③ 腿上げ運動 (写真1右)

です。必ずしもすべてをやる必要はなく、各動作は、多くても10回程度です。

効果の一例を写真2に示します。被験者は80歳の方で、40年間右片麻痺であり、(a)のように患側の右足は第三者の手を借りないと動かせない状況でした。マッスルスーツを着装し、(b)のように自分で可能な限り前屈し、(c)のようにマッスルスーツの力で伸展するという動作を10回程度繰り返した結果、直後に(d)のように患側の右足を自分で動かすことができるようになり、第三者が体幹を支えなくても歩行できるようになりました。

その他、長い間、さまざまなりハビリを行ってきても歩行が改善されなかった方が、訓練直後に劇的に歩行状態が改善したり、腰や膝の痛みがなくなったり、杖を使わず歩行ができるようになるなど、マッスルスーツを使った機能訓練はさまざまな効果があるようで、現在、30ヵ所以上の整骨院で使われており、医学的な検証もこれから開始します。

ところでこれらの効果は、おそらく姿勢を整える、つまり、骨盤の傾きや股関節の位置を矯正し、アライメントを整えることによるようです。また、歩行困難な方や足腰が弱った方だけでなく、一般の健常者でも姿勢矯正の効果は直後に現れます。例えば、上述の①と②を5回ずつ行い、その前後の姿勢を比べると、一目瞭然で分かります。一例を写真3に示しますが、これまで試したすべての方に、この姿勢矯正効果を確認しています。

おわりに

「生きている限り自立した生活」を実現する装置の最初の製品として、まず肉体労働者の支援用に開発した腰補助用マッスルスーツですが、期せずして、自立歩行につながる機



(a) 訓練前の歩行の状態

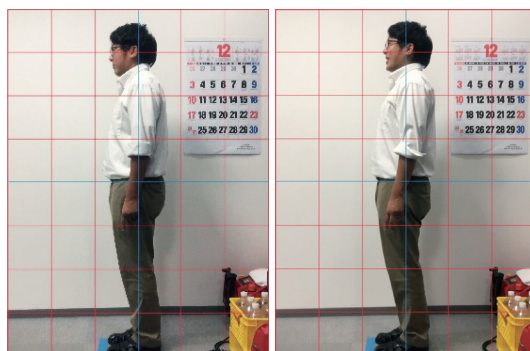
(b) 訓練 (前屈)



(c) 訓練 (伸展)

(d) 訓練直後の歩行

写真2 機能訓練の様子と効果



訓練前

訓練後

写真3 機能訓練前後の姿勢変化

能訓練装置として非常に効果的であることが分かってきました。自立歩行維持は、高齢者が健康を維持するための最も重要な要素の1つであり、この効果と訓練を広めてゆくとともに、医学的な効果の検証を進め、広く社会に貢献したいと考えています。